

**EVALUACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO  
ATMOSFÉRICO FRACCIONES GRUESAS Y FINAS, EN EL PASO DEL TREN DE  
CARBÓN POR EL MUNICIPIO DE ARACATACA MAGDALENA.**

**DANIEL FELIPE MELO PACHECO**



**UNIVERSIDAD DE LA COSTA  
DEPARTAMENTO DE CIVIL Y AMBIENTAL  
PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL  
BARRANQUILLA**

**2018**

**EVALUACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO  
ATMOSFÉRICO FRACCIONES GRUESAS Y FINAS, EN EL PASO DEL TREN DE  
CARBÓN POR EL MUNICIPIO DE ARACATACA MAGDALENA.**

**DANIEL FELIPE MELO PACHECO**

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE: INGENIERO AMBIENTAL.**

**DIRECTOR: DR. ISMAEL LUÍS SCHNEIDER**

**CODIRECTOR: ESP. ANA LUCÍA DUARTE GONZÁLEZ**

**UNIVERSIDAD DE LA COSTA**

**DEPARTAMENTO DE CIVIL Y AMBIENTAL**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA AMBIENTAL**

**BARRANQUILLA**

**2018**

**Nota de aceptación**

---

---

---

---

**Firma del presidente del jurado**

---

**Firma del jurado**

---

**Firma del jurado**

**Barranquilla, 5 de octubre del 2018**

### **Dedicatorias**

A Dios por llenarme de sabiduría e inteligencia espiritual para seguir el duro camino de la Ingeniería Ambiental y darme salud para dar lo mejor de mí en cada decisión tomada.

A mis padres Mónica y Julio, esos seres maravillosos que me dieron la vida, quienes han sido mis guías y consejeros a lo largo de mi vida, quienes en unión con mi hermana me acompañaron en este proceso formativo. En especial a mi madre, que fue mi compañera de batalla durante los muestreos en campo.

A todos y cada uno de mis compañeros en la universidad en especial a Sonia González y Fabián Ramírez por su apoyo y valiosa amistad a lo largo de todo este proceso de aprendizaje.

De esta manera les hago partícipes de mi gran felicidad y triunfo a todos y cada una de las personas que me apoyaron, porque este triunfo también es de ustedes.

Daniel Felipe Melo Pacheco

### **Agradecimientos**

A Dios, quien me dio las fortalezas y sabiduría para la oportunidad de vivir y experimentar momentos gratificantes como este.

Al profesor, Ismael Schneider, Docente de la Universidad de la Costa, quien fue guía en la adquisición de este nuevo conocimiento, durante la ejecución de este proyecto.

A la profesora, Ana Duarte, Docente de la Universidad de la Costa, por haberme brindado su asesoría y amistad durante el desarrollo del proyecto.

Al cuerpo de docentes que a lo largo de toda la carrera estuvieron siempre dispuestos a brindar su conocimiento para nuestro crecimiento profesional.

A la Universidad de la Costa y sus laboratorios que fueron de gran ayuda para poder ejecutar este proyecto.

A todos y cada una de las personas que de una u otra forma estuvieron todo el tiempo a mi lado apoyándome, aportando cada uno su granito de arena para cumplir este gran sueño.

### Resumen

Uno de los principales problemas ambientales a nivel mundial, es la contaminación del aire por medio de emisiones atmosféricas provenientes de actividades antrópicas. Según la Organización Mundial de la Salud, una de cada nueve muertes en todo el mundo es el resultado de condiciones relacionadas con la contaminación atmosférica, y los contaminantes más relevantes son el material particulado (MP) con un diámetro  $\leq 10 \mu\text{m}$ . En este estudio se evaluó las concentraciones de MP en las fracciones gruesas y finas, en el paso del tren de carbón por el municipio de Aracataca Magdalena. Para determinar las concentraciones máximas de MP en cada fracción se utilizó un contador de partículas y las variables meteorológicas (velocidad y dirección del viento, temperatura y humedad relativa) se obtuvieron con un anemómetro tipo Kestrel. Se analizaron las concentraciones en diferentes escenarios (paso del tren lleno y vacío, proceso de sedimentación y no paso del tren). Se observó un aumento significativo en las concentraciones para PTS ( $27,56 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ),  $\text{PM}_{10}$  ( $13,57 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ),  $\text{PM}_5$  ( $6,89 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ),  $\text{PM}_{2,5}$  ( $3,66 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ),  $\text{PM}_1$  ( $1,94 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y  $\text{PM}_{0,5}$  ( $1,43 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) durante el paso de los trenes llenos. Además, se determinó que las mayores concentraciones de partículas se presentaron en las horas de la mañana y final del día, períodos en que hay una reducción de la capa límite atmosférica. Finalmente se analizó la influencia de las variables meteorológicas en el proceso de dispersión de las partículas emitidas a la atmósfera, donde se determinó que las concentraciones de MP no son alteradas significativamente por estas variables.

**Palabras Clave:** Aire, Contaminación Atmosférica, Concentraciones, Material Particulado, Variables Meteorológicas

### Abstract

One of the main environmental problems worldwide is the pollution of the air through atmospheric emissions from anthropic activities. According to the World Health Organization, one in nine deaths worldwide is the result of conditions related to air pollution, and the most relevant pollutants are particulate matter (PM) with a diameter  $\leq 10 \mu\text{m}$ . This study evaluated the concentrations of MP in the coarse and fine fractions, in the passage of the coal train through the municipality of Aracataca Magdalena. To determine the mass concentrations of PM in each fraction, a particle counter and the meteorological variables (wind speed and direction, temperature and relative humidity) were used. were obtained with a Kestrel type anemometer. The concentrations were analyzed in different scenarios (full and empty train pass, sedimentation process and no train passing). There was a significant increase in the concentrations for PTS ( $27.56 \mu\text{g} / \text{m}^3$ ),  $\text{PM}_{10}$  ( $13.57 \mu\text{g} / \text{m}^3$ ),  $\text{PM}_5$  ( $6.89 \mu\text{g} / \text{m}^3$ ),  $\text{PM}_{2.5}$  ( $3.66 \mu\text{g} / \text{m}^3$ ),  $\text{PM}_1$  ( $1.94 \mu\text{g} / \text{m}^3$ ) and  $\text{PM}_{0.5}$  ( $1.43 \mu\text{g} / \text{m}^3$ ) during the passage of full trains. In addition, it was determined that the highest concentrations of particles occurred in the morning and end of the day, periods in which there is a reduction of the atmospheric boundary layer. Finally, the influence of meteorological variables on the dispersion process of the particles emitted to the atmosphere was analyzed, where it was determined that PM concentrations are not significantly altered by these variables.

**Keywords:** Air, Air Pollution, Concentrations, Particulate Material, Meteorological Variables

## Contenido

<b>1. Introducción .....</b>	<b>11</b>
<b>2. Problema de investigación .....</b>	<b>16</b>
<b>3. Justificación.....</b>	<b>18</b>
<b>4. Objetivos .....</b>	<b>19</b>
4.1 OBJETIVO GENERAL .....	19
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	19
<b>5. Marco teórico .....</b>	<b>20</b>
5.1 ANTECEDENTES .....	20
5.1.1 Nivel Internacional .....	20
5.1.2 Nivel Nacional .....	21
5.2 MARCO CONCEPTUAL .....	25
5.2.1.1 Producción del carbón .....	26
5.2.2 MATERIAL PARTICULADO .....	28
5.2.3 METEOROLOGÍA .....	31
<b>6. Diseño metodológico .....</b>	<b>32</b>
6.1 ÁREA DE ESTUDIO .....	32
6.2 DESARROLLO EXPERIMENTAL .....	33
<b>7. Resultados y discusión .....</b>	<b>36</b>
7.1 ANÁLISIS ESTADÍSTICO .....	36
7.2 INTERVALOS DE CONFIANZA .....	38
7.3 ANÁLISIS DE LAS ROSAS DE LOS CONTAMINANTES .....	41
7.4 ANÁLISIS DE CORRELACIÓN .....	44
<b>8. Conclusiones .....</b>	<b>46</b>
<b>9. Recomendaciones .....</b>	<b>48</b>
<b>10. Referencias.....</b>	<b>49</b>
<b>11. Anexos .....</b>	<b>56</b>



**Lista de tablas y Figuras****Tablas**

Tabla 1. Carbón de Colombia, según zona carbonífera .....	27
Tabla 2. Recursos más reservas de carbón en el departamento del Cesar (Mton).....	28
Tabla 3. Análisis descriptivos .....	36
Tabla 4. Comparativo de estudios realizados a nivel mundial .....	38
Tabla 5. Correlaciones de Sperman entre las concentraciones de MP y las variables meteorológicas .....	45

**Figuras**

Figura 1. Localización de Aracataca, área de influencia del proyecto.....	26
Figura 2. Fuentes de Material Particulado .....	29
Figura 3. Tipo de contaminantes atmosféricos .....	30
Figura 4. Proyecciones de emisiones en el tiempo, índice con respecto al 2010.....	30
Figura 5. Vista aérea de Aracataca, Magdalena, .....	32
Figura 6. Rosa de los vientos indicando la dirección proveniente de los vientos. Las velocidades del viento están expresas en m/s. Desde el punto evaluado.....	33
Figura 7. Intervalos de confianza 95% para las diferentes fracciones de tamaño de partículas y condiciones de transporte de carbón .....	40
Figura 8. Rosa de los contaminantes. Los colores indican las concentraciones de material particulado atmosférico en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .....	43

**Tabla de anexos**

Anexo 1. Evaluación de las concentraciones de MP durante el paso del tren lleno de carbón.....	56
Anexo 2. Contador de partículas HPC, midiendo las concentraciones de material particulado en tiempo real. ....	56
Anexo 3. Clasificación de concentraciones, según su escenario. ....	57
Anexo 4. Tabla de Análisis de varianza de $PM_{0,5}$ para Tren lleno (TL) y tren vacío (TV). ....	57
Anexo 5. Tabla de Análisis de varianza de $PM_{1,0}$ para Tren lleno (TL) y tren vacío (TV).....	58
Anexo 6. Tabla de Análisis de varianza de $PM_{2,5}$ para Tren lleno (TL) y tren vacío (TV). ....	58
Anexo 7. Tabla de Análisis de varianza de $PM_5$ para Tren lleno (TL) y tren vacío (TV).....	59
Anexo 8. Tabla de Análisis de varianza de $PM_{10}$ para Tren lleno (TL) y tren vacío (TV). ....	59
Anexo 9. Tabla de Análisis de varianza de PTS para Tren lleno (TL) y tren vacío (TV). ....	60

## 1. Introducción

El deterioro de la calidad del aire ha propiciado que se incrementen los efectos negativos sobre la salud humana y el medio ambiente (Rojas, 2010). Según el Ministerio de Ambiente en 2010 “Las concentraciones de algunos contaminantes en la atmósfera por encima de los estándares fijados en las normas ambientales en largos periodos de exposición han generado la necesidad de continuar impulsando la gestión de la calidad del aire para proteger la salud de la población y el ambiente”. Entre estos contaminantes, la emisión de Material Particulado (MP) en la atmósfera, es la principal causante del deterioro de la calidad del aire y la salud humana (MinAmbiente, 2015; Daniels, 2007).

La contaminación atmosférica se aplica por lo general a las alteraciones que tienen efectos perniciosos en los seres vivos y los elementos materiales, y no a otras alteraciones inocuas (Martinez y Diaz, 2004). La atmósfera está compuesta natural y originalmente por diversos gases entre los cuales el nitrógeno (78%) es el predominante, siguiéndole el oxígeno (21%) y completándose con cantidades sumamente reducidas de otros gases tales como argón (0,9%), dióxido de carbono (0,033%), Argón (0,93%), Kriptón (0,000114%), Neón (0,00182%) y Helio (0,000524%). Además de estos gases, de manera natural, el aire también contiene diversas partículas con características propias del sitio en que se encuentre un ambiente determinado y de la época anual (Silva, 2016). Debido a que son de tamaño, forma y composición variada, para su identificación se han clasificado en términos de su diámetro aerodinámico, que corresponde al diámetro de una esfera uniforme, en unidad de densidad que alcanza la misma velocidad terminal de asentamiento que la partícula de interés, y que está determinado por la forma y densidad de la partícula. De acuerdo a esto, pueden ser clasificadas como finas y gruesas (García et al., 2006).

El material particulado atmosférico en la fracción respirable está dividido en dos grupos principales de acuerdo a su tamaño  $PM_{10}$  y  $PM_{2,5}$  (MinAmbiente, 2015; Samara y Voutsas, 2005). Las partículas menores a  $10\ \mu m$  ( $PM_{10}$ ) consideradas gruesas, son partículas sólidas o líquidas dispersas en la atmósfera, en su mayoría de pH básico, producto de la combustión no controlada. Se compone en buena medida de partículas primarias emitidas directamente a la atmósfera, tanto por fenómenos naturales (incendios forestales o emisiones volcánicas) como por las actividades humanas (labores agrícolas, construcción, resuspensión de polvo, actividades industriales, etc). Y estas fracciones con diámetro aerodinámico menor o igual a  $10\ \mu m$  ( $PM_{10}$ ), pueden penetrar a diferentes profundidades del sistema respiratorio. La segunda fracción de tamaño de partículas atmosféricas,  $PM_{2,5}$ , se les consideran finas, las partículas menores a  $2,5\ \mu m$ , generalmente son ácidas, contienen hollín y otros derivados de las emisiones vehiculares e industriales. También, suelen estar compuestas principalmente por partículas secundarias formadas en la atmósfera a partir de un precursor gaseoso ( $NO_x$ ,  $SO_2$ , COV,  $NH_3$ , etc.) mediante procesos químicos o por reacciones en fase líquida. Estas partículas corresponden a la fracción más pequeña y agresiva debido a que éstas son respirables en un 100%, y tienen mayor efecto en la salud, ya que pueden ingresar al sistema respiratorio depositándose en los alvéolos pulmonares, llegando incluso al torrente sanguíneo y consecuentemente produciendo efectos negativos, tales como aumento en las enfermedades respiratorias, cardíacas, asma, bronquitis, enfisema, cáncer pulmonar, y disminución del funcionamiento pulmonar (Mapama, 2016). Las partículas más pequeñas de  $0,5\ \mu m$  pueden sobrepasar los mecanismos de defensa del sistema respiratorio y depositarse en los alvéolos pulmonares (Alvis, 2012; Préndez et al., 2007; Cohen y Hering, 1995). Por otro lado, están las Partículas Totales Suspendidas (PTS) que están constituidas tanto por compuestos orgánicos como inorgánicos, entre los que se encuentran los metales, los cuales provienen principalmente de fuentes industriales (Arciniega, 2012; Salvador, 2005; Warner, 1980).

Una de las fuentes generadoras de partículas finas es principalmente la quema de combustibles fósiles. Colombia es el país con mayores reservas de carbón en América Latina y cuenta con recursos potenciales de 16.992 Millones de toneladas (Mt), 6.746 Mt de reservas probadas de carbón, de las cuales la mayoría (unos 6.366 Mt) corresponde a carbón de muy buena calidad en la categoría de antracita y bitumen (carbón para uso energético), equivalentes al 94% del total de las reservas del país (Melo et al., 2015). La industria carbonífera colombiana esta principalmente orientada a la exportación. Según la información del Sistema Nacional Minero, Colombia produjo 85 Mt en 2013 y 88,5 Mt en 2014, en su mayoría carbón térmico, de los cuales 7.063 Mt son medidas, 4.57 Mt son indicadas, 4.237 Mt son inferidas y 1.119 Mt (Melo et al., 2015). En 2014, el mismo sistema estimó una producción de 95 Mt, de las cuales se destinaron aproximadamente 88,4 Mt para exportaciones (Melo et al., 2015). La mayoría de este carbón es transportado por medio de locomotoras férreas. Por otra parte, es el sexto exportador de carbón del mundo, con una participación de 6,3%, equivalente a 50 Mt anuales de carbón (UPME, 2013).

Las locomotoras utilizadas para el transporte del carbón liberan anualmente a la atmósfera más de 600.000 toneladas de óxido de nitrógeno y 50.000 toneladas de material particulado, principalmente debido a las emisiones provenientes del Diésel utilizado por las locomotoras (Drummond, 2013; Lashof et al., 2007). Además de estas emisiones, los trenes carboneros también liberan polvo de carbón en la atmósfera, exponiendo a las comunidades cercanas a su inhalación (Viney et al., 2011).

Una de las principales fuentes de contaminación del aire en la Costa Caribe Colombiana, específicamente en las regiones del Cesar y Magdalena, es la minería de carbón en todas sus etapas (extracción, transporte y exportación). Según la Contraloría General de la Nación (2013), “Este material pulverizado, denominado MP, así como el rocoso de donde

proviene, en contacto con el agua o por fricción mecánica, pueden lixiviar los contaminantes presentes en su superficie”.

El transporte del Carbón por medio de trenes en el norte de Colombia, tiene una trayectoria desde el departamento del Magdalena hasta el departamento del Cesar. Esta red férrea posee una longitud de 245 kilómetros que conecta el municipio de Chiriguaná con Ciénaga y Santa Marta. Los vagones que transportan el carbón se movilizan destapados, emitiendo durante su transporte grandes cantidades de MP, contaminando la atmósfera durante su paso desde su punto inicial hasta el final, y también con respecto a las variables meteorológicas, exponiendo, posiblemente la salud las personas (ELAW, 2010).

Aracataca, Magdalena es uno de los municipios de los cuales la línea férrea atraviesa al municipio por todo el centro, y se tiene en promedio que a cada 30 min pasa un ferrocarril con 120 vagones, con un tiempo aproximado de 15 min durante su paso por el área urbana. Al estar expuesta a esta actividad carbonífera la comunidad es susceptible a enfermedades respiratorias, por eso la salud humana no puede ser tratada separadamente del bienestar y del cambio socio ambiental e impacto al ecosistema. En 2015, no se conocían estudios oficiales que establezcan el daño ambiental de largo plazo que esta contaminación genera sobre la biodiversidad vegetal y animal de las zonas impactadas (Melo et al., 2015). Por eso en Colombia existe la Resolución 2254 del 2017 la cual indica los límites máximos permisibles de inmisión, de igual forma establece los niveles de alarmas que deben ser declarados por la autoridad ambiental, pero la normativa se queda corta a la hora de monitorear las partículas finas como el  $PM_{10}$ . Además, esta nueva resolución ya no considera la fracción de tamaño de partículas PTS (Partículas Totales Suspendidas).

En este estudio se determinaron las concentraciones de material particulado atmosférico de fracciones suspendidas totales, gruesas y finas, en los escenarios de paso de

tren lleno, paso de tren vacío, el no paso de trenes y sedimentación de partículas después del paso del tren, por el área urbana del municipio de Aracataca, Magdalena. Por tal motivo se busca identificar si esta actividad antropogénica genera algún efecto ambiental sobre las concentraciones de material particulado del área local.

## 2. Problema de investigación

Al paso de los años se ha demostrado que uno de los principales problemas ambientales es la alta concentración de material particulado atmosférico (MP) generado por la actividad minera (Rojas, 2010). Esta actividad antropogénica genera diversas formas de contaminación en cada uno de sus procesos. Uno de estos es el transporte de carbón por medio de ferrocarriles, los cuales han venido presentando emisiones de este contaminante en diferentes áreas del país. El volumen de carbón transportado en Colombia hasta 2016, es de más de 77 millones de toneladas por año, lo que equivale a cerca de 197 mil toneladas por día y 4.300 toneladas en cada viaje de tren (ANI, 2016). Actualmente en el municipio de Aracataca, Magdalena atraviesa la línea férrea la Loma-Puerto Santa Marta que transporta una gran cantidad de carbón. La mala disposición del producto dentro de los vagones, así como la resuspensión de las partículas de carbón, sumado a las distancias que se deben recorrer entre la mina y los puertos y la velocidad de ellos, son causa suficiente de riesgo para que muchas partículas se dispersen en las vías y contaminen el aire (ANI, 2016).

El tren carbonero atraviesa el centro del pueblo, en promedio 48 veces al día, la mitad de ellas cargado con 120 vagones llenos de carbón. Esto ha generado el malestar de la mayoría de los pobladores debido a la contaminación del medio ambiente y problemas de salud por el MP, además de ocasionar daños en las viviendas por la vibración y la obstrucción a la movilidad a su paso entre los dos extremos del municipio (Bengumea, 2014).

Las partículas suspendidas en la atmósfera con un diámetro mayor a  $10\text{ }\mu\text{m}$  no penetran más allá de la nariz porque se quedan atrapadas en las estructuras nasales filtrantes que protegen al resto del aparato respiratorio (Martin, 2016; Quijano y Orozco, 2005). En cambio, las partículas  $<2,5\text{ }\mu\text{m}$  representan la cantidad de partículas suspendidas que pueden ser emitidas directamente al aire o pueden formarse en la atmósfera como producto de



reacciones químicas y procesos físicos; estas partículas pueden alcanzar la cavidad alveolar y, por tanto, provocar daño en la salud humana (Martin, 2016; Quijano y Orozco, 2005). Según los estudios realizados sobre la calidad del aire en la ciudad de Santa Marta, las concentraciones más altas coinciden con el periodo de escasas lluvias, entre enero y abril donde el valor máximo y mínimo para PTS fueron de  $322,90 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $34,48 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (García et al., 2016).

Dada esta problemática, ¿Cuáles son las concentraciones de material particulado atmosférico en las fracciones gruesas y finas en un área influenciada por el transporte del carbón por línea férrea en el municipio de Aracataca, Magdalena? Además, ¿Cuánto es el aumento de la concentración dada por la actividad del transporte, y cuál es el horario de mayor impacto por el paso del tren de carbón?

A partir de los datos obtenidos se verificará el comportamiento de las concentraciones de MP con respecto a las variables meteorológicas. También se analizarán las concentraciones en diferentes escenarios, así como también la influencia en las concentraciones por el transporte del carbón en su paso por el área urbana de Aracataca, Magdalena.

### 3. Justificación

La calidad del aire en los departamentos de Cesar y Magdalena ha sido una de las más afectadas por la extracción y el transporte de carbón, principalmente por la emisión de partículas contaminantes, un fenómeno intrínseco en todas las etapas de la cadena de extracción del carbón (Melo et al., 2015). Estudios como el de Dominici et al. (2007) han demostrado una correlación entre los agentes contaminantes del aire, como lo es el carbón, y los accidentes cerebrovasculares. Por ejemplo, en los pacientes de Medicare, el cual es un programa de cobertura de seguridad social administrada por el gobierno de los Estados Unidos, se encontró una correlación entre los niveles ambientales de material particulado  $PM_{2.5}$  con las tasas de admisiones hospitalarias por enfermedad cerebrovascular (Dominici et al., 2007). Así mismo los niveles de material particulado  $PM_{10}$  estuvieron correlacionados con admisiones hospitalarias por accidente cerebrovascular isquémico según lo indica el estudio de Wellenios (2005).

Aracataca, Magdalena está influenciada por la actividad de transporte de carbón por vía férrea, debido a que parte el municipio en dos, la vía férrea y la comunidad, la cual está expuesta a las concentraciones de MP generadas por esta actividad. Por lo tanto, es muy importante evaluar si hay un aumento de las concentraciones de material particulado atmosférico ocasionado por el transporte del carbón por medio de trenes en todas sus condiciones de transporte (tren lleno, tren vacío y no paso de tren), comparando las concentraciones en cada uno de estos procesos. De esta manera, será posible determinar con exactitud las concentraciones a las cuales están expuestos los habitantes de la zona. Igualmente será posible evaluar cuál es la influencia de las condiciones meteorológicas en las concentraciones de material particulado atmosférico.

## **4. Objetivos**

### **4.1 Objetivo general**

Evaluar la concentración de material particulado atmosférico en las fracciones gruesas y finas en una región influenciada por el transporte de carbón por tren.

### **4.2 Objetivos específicos**

- Medir las concentraciones de material particulado en el área de influencia de la línea férrea.
- Comparar las concentraciones de material particulado bajo diferentes escenarios.
- Relacionar las concentraciones de material particulado con las variables meteorológicas.

## 5. Marco teórico

### 5.1 Antecedentes

#### 5.1.1 Nivel Internacional

En 2014 se realizó un estudio en Australia, donde se analizaron los datos de *Australian Rail Track Corporation* (ARTC) sobre emisiones de partículas del carbón y otros trenes en el corredor ferroviario de Hunter. Donde se determinaron las concentraciones en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en el paso de los trenes de carbón (llenos y vacíos) 5 minutos después del paso del tren y las concentraciones de fondo, dando como resultado que los aumentos correspondientes para  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2,5}$  y  $\text{PM}_1$  son aproximadamente 2, 0,7 y 0,12, respectivamente. Para un 10% de incremento en los diversos tipos de mediciones de partículas asociadas con los trenes de carbón (Ryan, 2014).

En 2014, se evaluaron las implicaciones de la calidad del aire del tráfico ferroviario en dos sitios en el estado de Washington, sus objetivos fueron cuantificar la exposición a partículas de diésel (DPM) y el polvo de carbón en el aire de los trenes actuales para los residentes que viven cerca de las líneas ferroviarias y medir el DPM y los factores de emisión de carbono negro (EF). Donde determinaron que los trenes abiertos de carbón tienen una concentración significativamente mayor de partículas de más de  $1\ \mu\text{m}$  de diámetro, probablemente polvo de carbón. Las mediciones de carbono negro (BC) muestran una fuerte correlación con  $\text{PM}_1$  y dan una relación BC/DPM promedio del 52% de las emisiones del ferrocarril diésel (Jaffe et al., 2014).

En 2015, se examinaron las emisiones de material particulado diésel (DPM) y el polvo de carbón de los trenes en Columbia River Gorge (CRG) en el estado de Washington midiendo  $\text{PM}_1$ ,  $\text{PM}_{2,5}$ ,  $\text{CO}_2$  y carbono negro (BC) durante el verano de 2014. Encontraron mejoras en los promedios de  $\text{PM}_{2,5}$  de 8,8 y 16,7  $\text{mg}/\text{m}^3$ , respectivamente, para trenes de

carga y carbón. También se concluyó que casi todos los trenes de carbón emiten polvo de carbón basado en mejoras estadísticamente más altas de  $PM_{2,5}$  de los trenes de carbón en comparación con los trenes de mercancías (Jaffe et al., 2015).

En 2017, en British Columbia, Canadá, se determinó el impacto de los trenes que transportan carbón en las concentraciones de material particulado, donde se analizaron las concentraciones de las partículas de  $PM_{10}$  y  $PM_{2,5}$  en las condiciones de paso de trenes (vacío y lleno) y el no paso del tren, dando como resultado en aumento de las concentraciones en las condiciones de paso del tren de  $16,4 \mu g/m^3$  para  $PM_{10}$  y  $15,1 \mu g/m^3$  para  $PM_{2,5}$ , y el no paso de  $12,3 \mu g/m^3$  para  $PM_{10}$  y  $9,8 \mu g/m^3$  para  $PM_{2,5}$  (Akoaka et al., 2017).

### **5.1.2 Nivel Nacional**

En el año 2000, en la ciudad de Santiago de Cali se realizó un estudio en zona de alto tráfico vehicular, por medio de modelos estadísticos, durante el periodo de 8 meses, en que se presentaron varios casos en que la norma local para el área en estudio fue superada. La norma local de índice de la calidad del aire, fue calculada con datos registrados dentro del área de estudio, con el objetivo que fuera específica para la zona de influencia (Botero et al., 2004).

En el mismo año en la ciudad de Medellín se realizaron diferentes mediciones con el fin de determinar las concentraciones de fondo de material particulado y sus variaciones espacio-temporales. Otras mediciones estuvieron encaminadas en la caracterización fisicoquímica del material particulado recolectado, obteniendo como resultado la variación temporal y espacial de las concentraciones de metales, con valores representativos para el caso de metales como el calcio, hierro y magnesio en las muestras del material colectado (Echeverri, 2000).

En el 2001, investigaciones realizadas en el Valle de Aburrá, en relación con partículas en suspensión total (PTS), arrojaron que el nivel de contaminación estaba

aumentando y los niveles superaron los  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , sobrepasando los niveles de precaución para la salud definidos por la Organización Mundial de la Salud - OMS ( $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Si se considera el material particulado respirable ( $\text{PM}_{10}$ ), el diagnóstico se confirma en su tendencia ascendente con niveles muy altos ( $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) con respecto al umbral de precaución fijado por la Organización Mundial Salud ( $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) para niveles de exposición crónica (Bedoya y Martínez, 2009).

En la ciudad de Bogotá, en un estudio realizado por Solarte et al. (2002) se determinó una asociación significativa entre el incremento en la concentración másica de material particulado en el aire y el aumento en el número de consultas por enfermedad de vía aérea, superior en menores de 14 años, basado en datos de los hospitales de los barrios Venecia, Bosa y Trinidad Galán. El estudio predice, a partir de sus resultados, que una disminución de  $\text{PM}_{10}$  en  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  produciría una disminución del 17% en el número de consultas por síntomas de enfermedades respiratorias. En general las fracciones que más aportan al material particulado son la geológica, asociada a polvo fugitivo y resuspendido, entre el 37 y 42%; las fracciones carbonáceas, que son las que más aportan, entre un 11 y 12% para el carbono elemental y un 34 y 43% para materia orgánica; la fracción iónica se encontró entre un 5 y 8% (Vargas y Rojas, 2010).

En 2004, se caracterizaron mediante análisis físico-químicos de muestras de MP, los metales presentes en el aire-fracción respirable  $\text{PM}_{10}$  en la ciudad de Bucaramanga, detectando en los resultados Al, Ca, Fe, Mg y Zn en todas las estaciones y en menor proporción se encontró Pb y algo de Ni y Cu (Quijano, 2004).

Según los estudios realizados sobre la calidad del aire en la ciudad de Santa Marta, las concentraciones más altas coinciden con el periodo de escasas lluvias, entre enero y abril. Al analizar las medias geométricas mensuales de material particulado, se observa que durante

todo el periodo de estudio se registraron concentraciones superiores a los  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en la mayor parte del área urbana de Santa Marta. Se encontró, además, que en todos los meses los mayores niveles de contaminación referida a la concentración de material particulado en el aire, se registran en el área del centro de la ciudad (García et al., 2006).

Se realizó un análisis de la concentración de Material Particulado  $\text{PM}_{10}$  reportado por las estaciones pertenecientes al sistema de vigilancia especial de la calidad del aire de la zona minera por cada uno de los municipios que conforman el triángulo minero teniendo en cuenta la información histórica reportada por la Corporación Autónoma Regional del Cesar CORPOCESAR la cual comprende los años 2007 al 2011. Con concentraciones de  $74,50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en 2007,  $46,06 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en 2008,  $62,86 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en 2009,  $37,49 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en 2010 y  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en 2011, para los años analizados, se observó que para los años 2008 y 2009 se presentaron incumplimientos de la recomendación OMS, sin embargo, se resalta que el promedio anual de los años 2007, 2010 y 2011, se encontró muy cerca de la guía. Respecto a la norma nacional Resolución 601 de 2006, la estación se encontraba aproximadamente entre 30 y  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  por debajo de las concentraciones establecidas (Quiroz y Medina, 2012).

Una investigación realizada en el Cesar sobre un análisis de los registros contenidos en el Sistema Especial Vigilancia de Calidad del Aire de la Zona Carbonífera del Cesar - SEVCAZCC. Donde se evaluó la efectividad de las medidas de manejo ambiental en la mitigación de los impactos generados por las emisiones de material particulado, para establecer propuestas de mejora e intervención por parte de los diferentes actores. Este estudio mostró que las concentraciones de material particulado ( $\text{PST}$  y  $\text{PM}_{10}$ ), guardan un patrón estadístico asociado a los periodos seco y lluvioso de la zona, donde se demostró la influencia de medidas como la pavimentación y riego de vías en la disminución de las concentraciones registradas por la red de monitoreo. No obstante, las medidas en la

disminución de los registros de las concentraciones presentaban ineficiencia en las estaciones de monitoreo (Alvis, 2012).

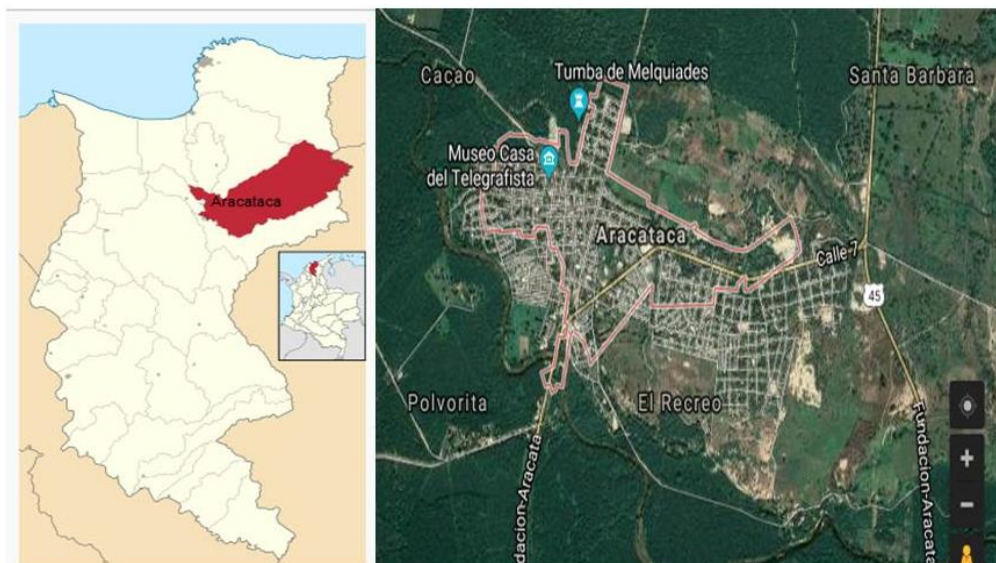
En 2016 se evaluaron los niveles de algunos metales (Al, Cr, V, Hg, Pb, Ni, Zn, Cr, As, Se, Cd, Cu, Fe y Co) generados principalmente por las actividades mineras de carbón mineral en la zona de La Guajira, norte de Colombia. Los metales analizados presentaron diferencias estadísticamente significativas entre las zonas de muestreo. La gran mayoría de los metales se presentan en mayor concentración en la zona minera, en comparación con el sitio tomado como testigo ubicado en la ciudad de Riohacha, a una distancia aproximada de 150 km. Por otra parte, para el período global los metales se presentan en mayor concentración en la época de sequía que en la de lluvias. El análisis estadístico permitió confirmar la actividad minera como la fuente principal de emisión de este tipo de contaminantes metálicos en la atmósfera sobre la región de La Guajira (Doria y Fagundo, 2016).

Actualmente en el Municipio de Aracataca, Magdalena no se han realizados estudios los cuales evalúen las concentraciones de material particulado atmosférico de fracciones gruesas y finas, a las cuales están expuestas la población circuncidante a la línea férrea.



### **5.2 Marco conceptual**

El municipio de Aracataca Magdalena está localizado a 40 m.s.n.m. al norte del departamento del Magdalena, en la subregión Sierra Nevada de Santa Marta; tiene una temperatura promedio de 28°C. Comprende dos regiones perfectamente definidas, una al occidente: plana y baja de altas temperaturas, en las proximidades de la Ciénaga Grande de Santa Marta, y la otra al oriente, formada por la Sierra Nevada de Santa Marta, que tiene elevaciones hasta de 5.775 m (Alcaldía de Aracataca, 2013). Ver figura 1. En 1995 iniciaron las actividades de transporte del carbón por medio de vías férreas, el cual atraviesa el municipio: Todavía, hasta la fecha no se han realizado estudios que evalúen las concentraciones de material particulado atmosférico a las cuales están expuestas la población influenciada por esta actividad, sin embargo, las empresas transportadoras hacen seguimientos a los niveles de PTS pero dicha información no es pública. Esto ha generado el malestar de la mayoría de los pobladores debido a la contaminación del medio ambiente y problemas de salud por el ruido y el polvillo, los daños en las viviendas por la vibración y la obstrucción a la movilidad a su paso entre los dos extremos del municipio (Benjumea, 2014).



Coordenadas: [10°35'28"N 74°11'06"O](#)

Superficie: 1755 km<sup>2</sup>

Elevación: 40 m. s. n. m.

*Figura 1. Localización de Aracataca, área de influencia del proyecto.*

*Fuente: Google Earth y Alcaldía de Aracataca.*

### 5.2.1 El Carbón

El carbón es una roca sedimentaria originada por la acumulación, enterramiento y transformación rico en carbono de restos de materia vegetal. Está principalmente acumulado en el período Carbonífero de la Era Primaria. El carbón es de color pardo a negro, de aspecto mate y a veces brillante, ligero y de escasa dureza. Su composición y propiedades dependen de las condiciones fisicoquímicas en las que se produce la transformación. Los yacimientos de carbón se encuentran muy repartidos en la corteza terrestre a lo ancho de todo el mundo (Martin, 2016; Villanueva, 2009; Evangelista, 2007).

#### 5.2.1.1 Producción del carbón

La producción mundial de carbón térmico alcanzó la cifra de 5.294,75 Mt (IEA, 2011), con un crecimiento anual de 5,73% respecto al año 2009 y un promedio anual del 5,77% para los últimos 5 años. Colombia cuenta con recursos de carbón de excelente calidad, suficientes para participar en el mercado mundial por largo tiempo. Las reservas medidas son

de 7.063,6 Mt, ubicadas principalmente en la Costa Atlántica, donde se encuentra el 90% del carbón térmico que a su vez corresponde al 98% del carbón nacional. El 95% de las reservas se ubica en los departamentos de La Guajira, Cesar, Córdoba, Norte de Santander, Cundinamarca, Boyacá, Antioquia, Valle del Cauca y Cauca (Melo et al., 2015). Es el noveno productor mundial de carbón térmico, con aproximadamente el 1,32% del total a nivel mundial. Y es el cuarto exportador de carbón térmico, el que en su mayor parte proviene de los departamentos de Cesar y La Guajira. El carbón tiene diferentes características físicas y químicas, las cuales se presentan en la Tabla 1. Donde se muestran diferentes departamentos de donde se extrae el carbón y sus respectivas características (Melo et al., 2015).

Tabla 1.

*Carbón de Colombia, según zona carbonífera*

Zona	Área	Sector	Humedad %	Cz %	MV %	CF %	St%	PC BTU/lb	PC MJ/kg	PC Kcal/kg
La Guajira	Cerrejón Norte Cerrejón Central Cerrejón Sur		Eq. + 1	11,94	6,94	35,92	45,20	0,43	11,586	6.440
		Sinclinal La Loma El Boquerón	Eq. + 1	11,39	10,32	33,37	66,63	0,72	10.867	6.040
		El Descanso Sur	Eq. + 1 ½	10,39	5,61	36,79	47,31	0,59	11.616	6.450
Cesar	Loma La Jagua de Ibirico	San Pedro Cerro Largo	Eq. + 1 ½	7,14	5,32	35,70	51,84	0,62	12.606	7.000
		San Pedro Sur	HR	14,49	9,24	37,55	38,73	1,31	9.280	5.160
		San Pedro Norte	HR	14,49	9,24	37,55	38,73	1,31	9.280	5.160
Córdoba-Norte de Antioquia	Alto San Jorge	Alta San Jorge	HR	14,49	9,24	37,55	38,73	1,31	9.280	5.160
Cz: Cenizas			MV: Materiales Volátiles		CF: Carbón Fijo		St: Azufre Total		PC: Poder calorífico	

*Fuente: Informe de la Unidad de Planeación Minero Energetica (Arango, 2013).*

La producción estimada de carbón coquizable colombiano en el año 2010 alcanzó los 4,57 Mt, presentando un incremento anual del 80,21% en el volumen producido respecto a 2,54 Mt del año 2009. Dicha producción representa el 0,51% del volumen total de producción de carbón coquizable mundial (Melo et al., 2015).

El carbón del Cesar es bituminoso, alto en volátiles, de buena calidad desde el punto de vista de su poder calórico estimado en 27.02 MJ/kg (11.600 BTU/lb) en promedio, con bajos contenidos de humedad, cenizas y azufre, que los hacen competitivos en el mercado internacional para ser utilizados en la industria y en la generación de calor, vapor y electricidad (Melo et al., 2015). Ver tabla 2.

*Tabla 2.*

*Recursos más reservas de carbón en el departamento del Cesar (Mton)*

Zona	Área	Recursos más reservadas básicas			Recursos Hipotéticos	Potencial	Tipo
		Medidos	Indicados	Inferidos			
Cesar	La Loma	1.777,10	1.563,98	1.963,18	993,50	6.297,76	T
	La Jagua de Ibirico	258,30				258,30	T
	Totales	2.035,40	1.563,98	1.963,18	993,50	6.556,06	T

*Fuente: Informe de la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME).*

La producción de carbón en los últimos veinticinco años ha tenido un crecimiento constante, en especial a partir del año 2000. Hasta la década de los ochenta, cuando iniciaron las exportaciones desde Cerrejón Zona Norte (Arango, 2013).

### 5.2.2 Material particulado

El material particulado (MP) es un conjunto de partículas sólidas y líquidas emitidas directamente al aire, cuyo tamaño se considera que está comprendido entre 0,002  $\mu\text{m}$  y los 100  $\mu\text{m}$  (Akoaka et al., 2017; Salvador, 2005), tales como el hollín de diesel, polvo de vías, el polvo de la agricultura y las partículas resultantes de procesos productivos (Fang et al., 2006). Ejemplos de partículas atmosféricas son las partículas producidas por los procesos de combustión, procesos fotoquímicos, partículas de sal formadas por el spray del océano y partículas de tierra resuspendidas (Díaz y Páez., 2006), las cuales se pueden presentar líquidas y otras sólidas, otras pueden contener un centro sólido rodeado por un líquido o

incluso ser higroscópicas. Las partículas atmosféricas contienen iones inorgánicos, componentes metálicos, carbón elemental, compuestos en forma de cristales y compuestos orgánicos, esta última es especialmente compleja porque contienen miles de compuestos (Baca, 2014). El material particulado forma parte de los denominados contaminantes criterio que son los considerados como de mayor impacto en la salud humana por lo cual, se ha generado una normatividad donde se marcan límites permisibles de concentración en un período de tiempo buscando reducir sus efectos nocivos (Vicente, 2015). Existen distintos tipos de fuentes generadoras de material particulado atmosférico, estas se subdividen en primarias y secundarias, tal como se evidencia en la Figura 1.

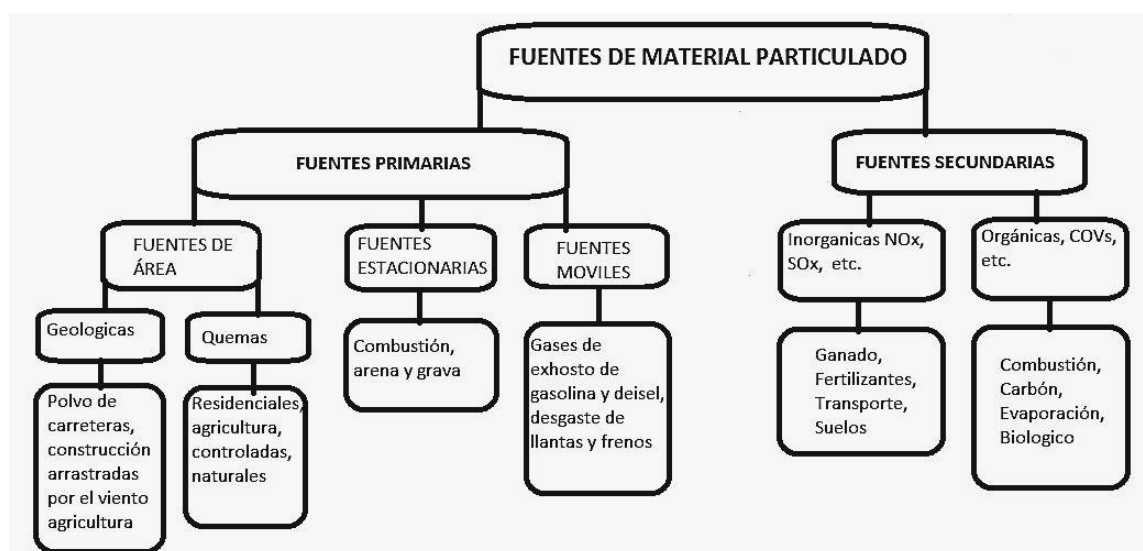


Figura 2. Fuentes de Material Particulado

Fuente: Asociación colombiana de ingenieros

Las fuentes móviles son una fuente primaria generadora de material particulado por medio de la combustión incompleta de las quemas de combustible, estas partículas emitidas a la atmósfera pueden clasificarse de la siguiente forma (García, 2006). Ver figura 2.

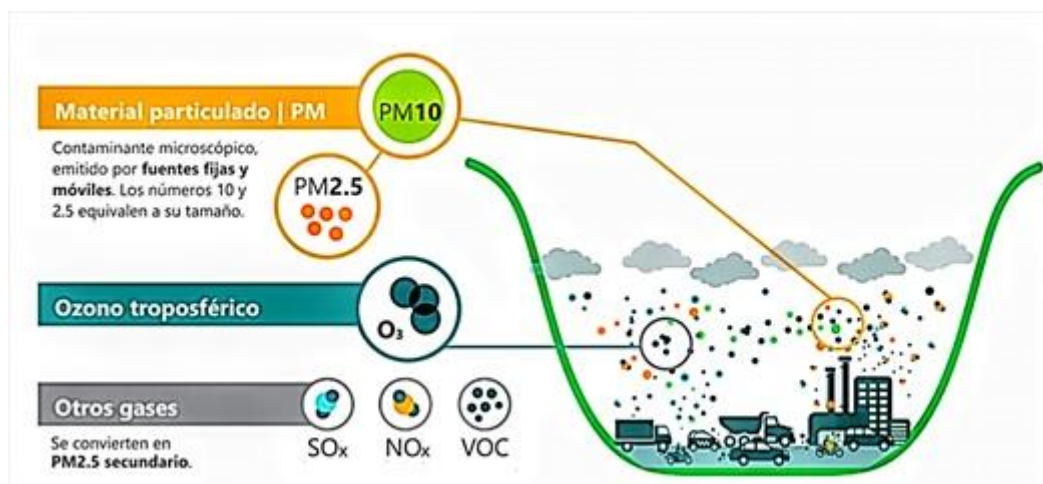


Figura 3. Tipo de contaminantes atmosféricos

Tomado de: Metropól

Las partículas atmosféricas  $\text{PM}_{10}$  y  $\text{PM}_{2.5}$  son partículas microscópicas y generadas por la quema de combustible fósiles, que quedan suspendidas en el aire. Estas partículas, pueden adherirse a metales pesados, lo que los hace aún más nocivos para la salud, puesto que, su tamaño le permite ingresar a las vías respiratorias, llegando a penetrar y alojarse en el interior profundo de los pulmones, por lo cual, a menor diámetro del material particulado, mayor será el potencial daño en la salud (Cruz, 2010). Estimaciones recientes muestran que las emisiones de contaminantes en el aire se han elevado globalmente en un 8% entre 2008 y 2013 (Cruz, 2010). Ver Figura 3.

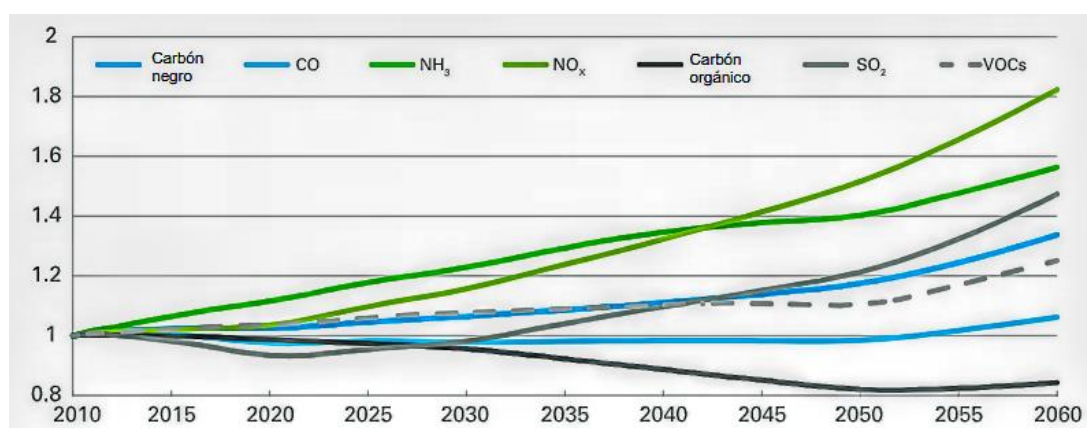


Figura 4. Proyecciones de emisiones en el tiempo, índice con respecto al 2010

Fuente: Universidad EAFIT

En términos generales, la contaminación atmosférica a través del tiempo ha estado marcada por eventos, episodios y accidentes que han generado impactos negativos a las personas y el medio ambiente (Chamarra y Saavedro, 2013).

La dispersión de contaminantes en la atmósfera depende de múltiples factores, entre los que se encuentran los meteorológicos y su influencia en el comportamiento del material particulado, estos son: dirección y velocidad del viento, precipitación y radiación solar, entre otros (IDEAM, 2012). La dispersión de estos en la atmósfera, es afectada por las condiciones locales del área y las características de la superficie, siendo este un factor que incide en el transporte y arrastre de los elementos contaminantes (Silva y Arcos, 2009).

### **5.2.3 Meteorología**

El estudio de la atmósfera se basa en el conocimiento de una serie de magnitudes, o variables meteorológicas, como la temperatura, la presión atmosférica o la humedad, las cuales varían tanto en el espacio como en el tiempo (Rodríguez et al, 2004).

La temperatura, la radiación solar y la velocidad del viento controlan el movimiento vertical del aire y la estabilidad de la troposfera inferior, lo que resulta en cambios en la altura de mezclado y en la dilución efectiva de los contaminantes transportados por el aire (González et al., 2014). La dispersión de los contaminantes en la atmósfera depende principalmente del viento, de la velocidad y de la dirección del mismo, lo que genera turbulencia del aire (Arrita, 2016).



## 6. Diseño metodológico

### 6.1 área de estudio

La zona evaluada en el presente estudio, está ubicada en el municipio de Aracataca en el departamento del Magdalena al norte de Colombia. Con una población de 40.400 habitantes en 2017 y una elevación de 40 m.s.n.m, sus coordenadas son  $10^{\circ}35'28''\text{N}$  y  $74^{\circ}11'06''\text{O}$  (DANE, 2017). Es el área bajo influencia de la actividad minera que se realiza en los departamentos del Cesar y Magdalena.

Para este estudio el área de influencia será toda el área urbana circuncidante a la línea férrea como se muestra en la Figura 5.



Figura 5. Vista aérea de Aracataca, Magdalena,

Fuente: Google Earth



## 6.2 Desarrollo experimental

Inicialmente se identificó, con ayuda de Google Earth, el punto de muestreo estratégico, el cual estuviera alejado de emisiones por combustión del transporte de fuentes móviles, además de actividades industriales que posiblemente podrían emitir material particulado atmosférico, y de esta manera afectar la interpretación de los resultados. Esto debido a que el estudio se centró en determinar las concentraciones de MP que genera el transporte de carbón sobre las concentraciones de MP.

Luego, se procedió a reconocer el punto escogido en campo, para determinar el lugar óptimo para realizar las mediciones. Se tuvo en cuenta una ubicación que presentara seguridad para el muestreo y en que según la dirección del viento no hubiera obstrucción al paso del aire por ninguna capa vegetal u otro obstáculo en la ubicación seleccionada. Esta información se muestra en la Figura 6.



Figura 6. Rosa de los vientos indicando la dirección proveniente de los vientos. Las velocidades del viento están expresas en m/s. Desde el punto evaluado.

Fuente: Wrplot, Google Earth y Paint

Seguidamente, se ubicaron los equipos utilizados durante el estudio, un contador de partículas modelo HPC-601 de la empresa Hal Technology, y un termo-anemómetro modelo Kestrel Bluetooth 3500. Para un buen análisis de los datos, los horarios y fecha de los dos equipos fueran sincronizados. Ver anexo 1.

El contador de partículas HPC mide las concentraciones de seis fracciones de tamaño de partículas en simultáneo, con una resolución temporal de cada minuto, de las concentraciones másicas. Las fracciones que evalúa son PTS, PM<sub>10</sub>, PM<sub>5</sub>, PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>1</sub> y PM<sub>0,5</sub>. El Kestrel es un equipo utilizado para evaluar las variables meteorológicas como velocidad y dirección del viento, humedad relativa y temperatura. Este equipo genera los datos en tiempo real, dando un promedio cada minuto.

Se colocaron en marcha los equipos y se realizaron mediciones periódicamente, durante 4 meses. Los días 18 y 19 del mes de agosto para un total de 338 datos. Los días 1, 2, 15 y 16 de septiembre con una totalidad de 1154 datos. Los días 5 y 6 de octubre con un total de 599 datos y el 12 y 13 de noviembre con una totalidad de 601 datos. Para un total de 2692 datos en un horario diurno. Cabe resaltar que las empresas transportadoras trabajan 24 horas al día los 7 días a la semana con la misma frecuencia. Se escogió este periodo debido a las condiciones meteorológicas, porque es en la temporada seca donde se registran las concentraciones más elevadas de material particulado y en la temporada de lluvias disminuye. Esto se ha asociado a la influencia de la lluvia que disminuye las concentraciones de contaminantes en la atmósfera (Pérez et al., 2010). Ver anexo 2.

Para el análisis estadístico de los datos obtenidos, se realizó una subdivisión de los datos de acuerdo con la condición de paso de las locomotoras en cada uno de los periodos de muestreo. De esta forma, los datos se clasificaron de la siguiente manera: Ver anexo 3.

- NP: no pasó del tren
- TL: Paso del tren lleno
- TV: Paso del tren vacío
- S: sedimentación
- TLOM: Tren lleno con otro material

Para determinar el tiempo de sedimentación de las partículas, después del paso de los trenes, se tomó como base una investigación realizada en Canadá, donde se evaluaba las concentraciones de MP por combustión de Diésel, el cual indicó un tiempo de 5 min después del paso del tren (Akaoka y Mckendry, 2016). Es importante resaltar que el tiempo de sedimentación fue considerado después del paso del tren, tanto del tren lleno como del tren vacío.

Se analizaron los datos por medio de análisis estadístico descriptivo, intervalos de confianza, rosa de contaminantes. También se realizó una correlación de Spearman, debido a que los datos no tuvieron una distribución normal, y un análisis de varianza.

## 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 7.1 Análisis estadístico

Para comprender las variaciones en las concentraciones de material particulado atmosférico, en sus diferentes fracciones de tamaño de partículas y condiciones de transporte de carbón, se realizó un análisis descriptivo considerando media, desviación estándar, las concentraciones máximas y mínimas para cada una de las condiciones evaluadas (Ver Tabla 3).

Tabla 3.

*Análisis descriptivos*

Variable	Condición	N	Media $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Desv.Est. $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Mínimo $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Máximo $\mu\text{g}/\text{m}^3$
PM <sub>0,5</sub>	NP	1549	1,13	0,70	0,13	3,07
	S	302	1,32	0,86	0,16	3,54
	TL	120	1,32	0,86	0,20	3,94
	TV	116	1,43	0,95	0,17	4,34
PM <sub>1</sub>	NP	1549	1,50	0,97	0,16	5,00
	S	302	1,79	1,24	0,22	5,36
	TL	120	1,89	1,25	0,27	5,94
	TV	116	1,94	1,37	0,23	6,47
PM <sub>2,5</sub>	NP	1549	2,50	1,84	0,22	9,32
	S	302	3,15	2,48	0,40	11,19
	TL	120	3,66	2,81	0,51	13,44
	TV	116	3,45	2,64	0,42	9,90
PM <sub>5</sub>	NP	1549	4,61	3,06	0,77	16,80
	S	302	5,78	4,15	1,13	18,07
	TL	120	6,89	5,18	1,17	25,69
	TV	116	6,25	4,35	1,17	16,86
PM <sub>10</sub>	NP	1549	9,28	5,75	1,83	29,55
	S	302	11,46	7,58	2,23	35,61
	TL	120	13,57	9,86	2,78	46,91
	TV	116	12,07	7,55	2,44	28,98
PTS	NP	1549	19,28	13,13	3,23	53,03
	S	302	23,76	15,98	3,93	70,75
	TL	120	27,56	19,13	5,47	78,37
	TV	116	24,1	14,4	6,14	63,49

**Fuente:** Elaboración propia Melo D.

N: cantidad de datos tomados

NP: No paso del tren

S: Sedimentación

TL: Paso del tren lleno

TV: Paso del tren vacío

Para la fracción de tamaño de partículas PTS, PM<sub>10</sub> y PM<sub>5</sub>, se observa que la condición que mayor concentración presentó fue al paso del tren lleno (Figura 7). Eso se puede atribuir a que las partículas de este tamaño se originan principalmente por las actividades de resuspensión de partículas y por fuentes diversas (García et al., 2006), y el polvo de carbón se refleja en los recuentos de partículas más grandes como PTS y PM<sub>10</sub> (Ryan, 2014). Esto se puede evidenciar en el análisis de varianza donde se compararon las condiciones de paso del tren lleno y tren vacío. Se determinó que los promedios para las dos fracciones en estas condiciones de transporte no son iguales y que el transporte del carbón genera un aumento significativo de las concentraciones de las fracciones gruesas (Anexos 7, 8 y 9). Igualmente, para las fracciones de partículas finas, se observa que la mayor concentración para PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>1</sub>, y PM<sub>0,5</sub>, se presentan al paso del tren en cualquiera de las condiciones (lleno o vacío) (Figura 7) (Anexos 4, 5 y 6). Eso se relaciona a que este tamaño de partículas es proveniente principalmente de fuentes móviles por las emisiones por quema de combustibles fósiles (Dockery y Pope, 1994; Keill y Maycut, 2003; PSCAA, 2005; Ryan, 2014). Además, en el análisis de varianza (ANOVA), se pudo determinar que supera la probabilidad de 0,05 lo que indica que los promedios son iguales cuando se compara el paso del tren lleno o vacío (Anexos 4, 5 y 6). Estudios a nivel mundial sobre las concentraciones de material particulado cerca de una línea férrea, demuestran los aumentos de las concentraciones al paso de un tren carbón para todas las fracciones estudiadas, al ser comparadas con esta investigación, se puede analizar que tiene un comportamiento similar a la de esta investigación. Ver tabla 4.

Tabla 4.

*Comparativo de estudios realizados a nivel mundial*

Autor	Condición	Ciudad País	PTS $\mu\text{g}/\text{m}^3$	PM <sub>10</sub> $\mu\text{g}/\text{m}^3$	PM <sub>2,5</sub> $\mu\text{g}/\text{m}^3$	PM <sub>1</sub> $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Investigación (2017)	TL		27,56	13,57	3,66	1,89
	TV	Aracataca	24,1	12,07	2,64	1,94
	NP	Colombia	19,24	9,28	1,84	1,50
	S		23,76	11,46	2,48	1,79
Ryan (2014)	TL	Sydney	33,20	25,93	10,55	6,66
	TV		30,19	25,98	10,58	6,59
	NP	Australia	28,93	22,78	9,35	6,34
	S		33,7	26,42	10,73	6,64
Akoaka (2016)	TL	South Delta,	N/A	16,4	15,1	N/A
	TV	British	N/A	13,2	10,4	N/A
	NP	Columbia.	N/A	12,3	9,8	N/A
	S	Canadá	N/A	N/A	N/A	N/A

*Fuente: Elaboración propia Melo D.*

## 7.2 Intervalos de confianza

Se realizó una interpretación de los intervalos de confianza 95% para las diferentes fracciones de tamaño de partículas y condiciones de transporte de carbón (Figura 7). Un intervalo de confianza es un rango de valores, derivado de los estadísticos de la muestra, que posiblemente incluya el valor de un parámetro de población desconocido. Gráficamente los intervalos de confianza de las partículas más grandes como PTS y PM<sub>10</sub>, presentan claramente que el paso del tren lleno aumentó las concentraciones de estas partículas de mayor tamaño, lo que se le podría atribuir al transporte del carbón debido a que las partículas de menor tamaño son del hollín o quema de combustibles fósiles. Igualmente se observa un aumento de la concentración de partículas en estas fracciones de tamaño (PTS y PM<sub>10</sub>) con el paso del tren vacío. Por lo tanto, estadísticamente, no se puede diferenciar un aumento de las

concentraciones de MP por el paso del tren cargado con carbón o el paso del tren vacío.

Resultado similar fue observado en un estudio realizado en Canadá, que también observaron aumentos de las concentraciones de MP en los rangos de tamaños más grandes para trenes que transportaban carbón (Akaoka y Mckendry, 2017). La única manera de evaluar cuál es el porcentual de contribución por el paso del tren y cuál es la contribución por la resuspensión del carbón sería por medio de un análisis químico del MP. Para las partículas de menor tamaño tales como las fracciones  $PM_{2,5}$ ,  $PM_1$  y  $PM_{0,5}$  las diferencias de concentraciones según las condiciones de paso del tren son aún menos significativas, lo que confirma la hipótesis de que las partículas de este tamaño son originadas debido a la quema de combustible fósil (diésel) y esto generará aumento de las concentraciones de partículas de menor tamaño (Gaviria et al., 2011). Por lo tanto, si hay alguna contribución de emisión de carbón durante el transporte, para las partículas de menor tamaño esta influencia es mínima. Ver figura 7.

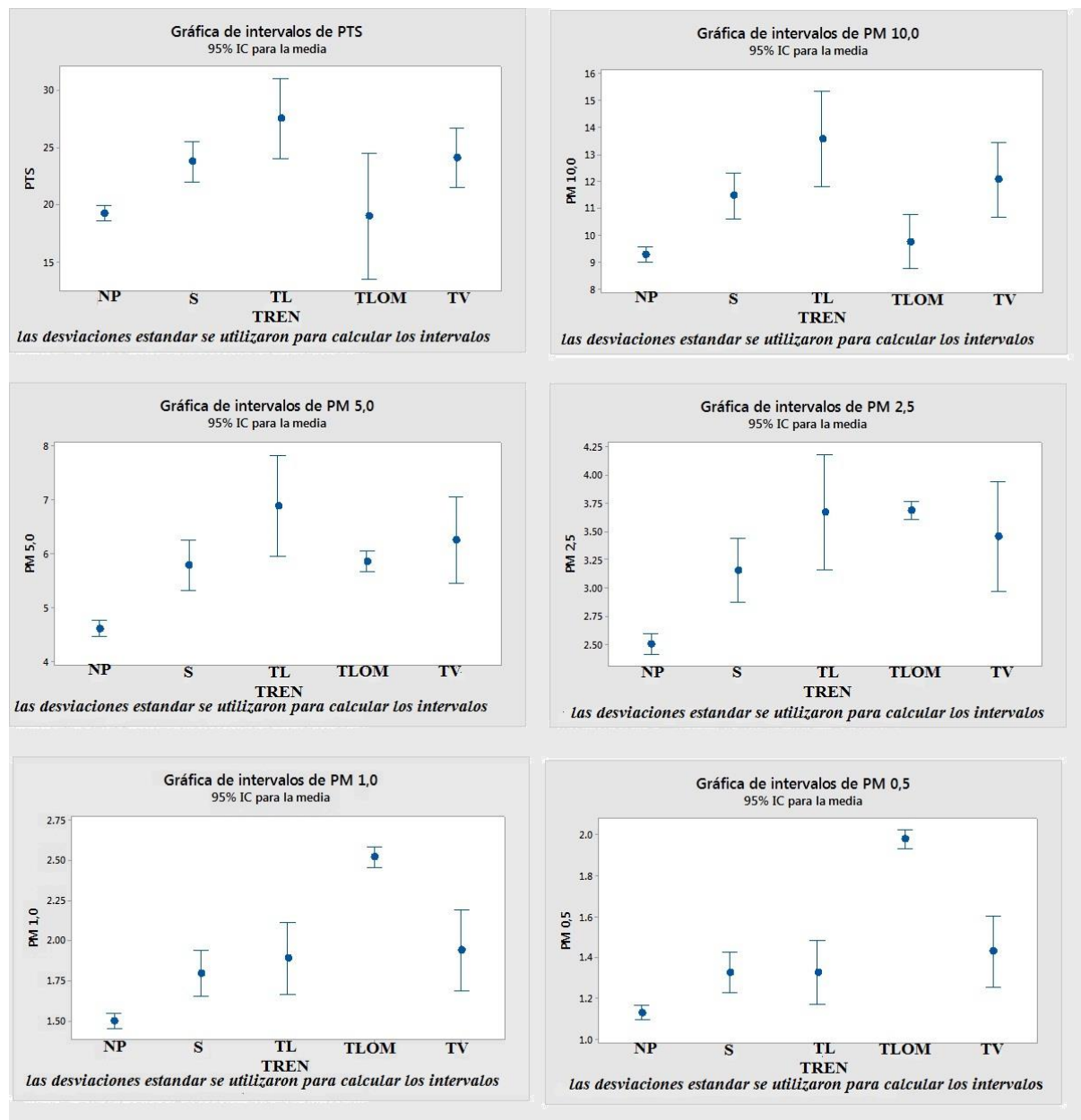


Figura 7. Intervalos de confianza 95% para las diferentes fracciones de tamaño de partículas y condiciones de transporte de carbón

**Fuente:** Elaboración propia Melo D.

En la figura 7, se puede analizar que para todas las fracciones de partículas muestreadas hay un aumento notable de las concentraciones al paso del tren lleno, en especial en las fracciones gruesas, se puede analizar el aumento de las concentraciones del paso del tren lleno de carbón, en comparación con el no paso del tren, pero no son estadísticamente



significativas para el caso de las fracciones finas, es difícil de analizar, dado a que no es notorio la diferencia entre el paso del tren lleno de carbón y el paso del tren vacío.

También se puede analizar las diferencias entre el paso del tren lleno de carbón en comparación con el paso del tren vacío, se refleja un alto margen confianza para las partículas gruesas, esto se puede relacionar a que las partículas del carbón transportado son de mayor tamaño y aportan al aumento de las concentraciones de las fracciones gruesas. Para las fracciones finas hay un bajo margen de confianza debido a que las principales fuentes generadoras de partículas finas son las emisiones de diésel, entonces se podría decir que habrá una semejanza entre las concentraciones del paso del tren lleno de carbón como las del paso del tren vacío. Cabe resaltar que los datos no son estadísticamente significativos, debido a que la al comparar la F con el valor crítico de F, y resulta ser menor el F que el valor crítico de F, es aceptada la hipótesis. (Ver Anexos 4, 5 y 6).

### **7.3 Análisis de las rosas de los contaminantes**

A partir de los datos obtenidos se realizó una rosa del contaminante por cada uno de los tamaños de partículas muestreados. Esta información está representada en la Figura 8.

Las concentraciones máximas para las partículas de gran tamaño como PTS y PM<sub>10</sub> llegaron a ser de 78,37 y 46,91  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , respectivamente (Tabla 3). Además teniendo en cuenta la variables meteorológicas, la dirección del viento predominante durante el monitoreo es del sur occidente, lo que indica que se presenta contribución de la comunidad. Al analizar las mayores concentraciones de MP se observa que estas ocurrieron en momentos en que las velocidades del viento estaban en un rango de 2 a 3 m/s, lo que indica que la velocidad del viento es directamente proporcional al aumento de las concentraciones en un área determinada (Venegas y Mazzeo, 2012). Esto se da por la resuspensión de las partículas a

medida que aumenta la velocidad del viento (Molina, 2017). También por el balance entre la dilución atmosférica de los contaminantes generados por la velocidad del viento y la influencia del viento sobre la elevación de la pluma de contaminantes (Venegas y Mazzeo, 2012).

Dado que el municipio de Aracataca, Magdalena está a un costado de la Sierra Nevada de Santa Marta, las velocidades del viento son bajas oscilando entre 0 y 5 m/s, eso ayuda a que la dispersión de los contaminantes sea baja, en cuanto mayor es la intensidad del viento, será mayor la concentración de contaminantes en el aire (Venegas y Mazzeo, 2012). Esto se relaciona con el aumento de las velocidades del viento en el aumento de la resuspensión de partículas y además transporte de ellas. Un informe realizado por la Universidad de Pablo Olavide de Sevilla en España afirma que los contaminantes emitidos a la atmósfera son transportados en la dirección del viento predominante y dispersados por movimientos de aire perpendiculares al viento, así como por turbulencia (More, 2014).

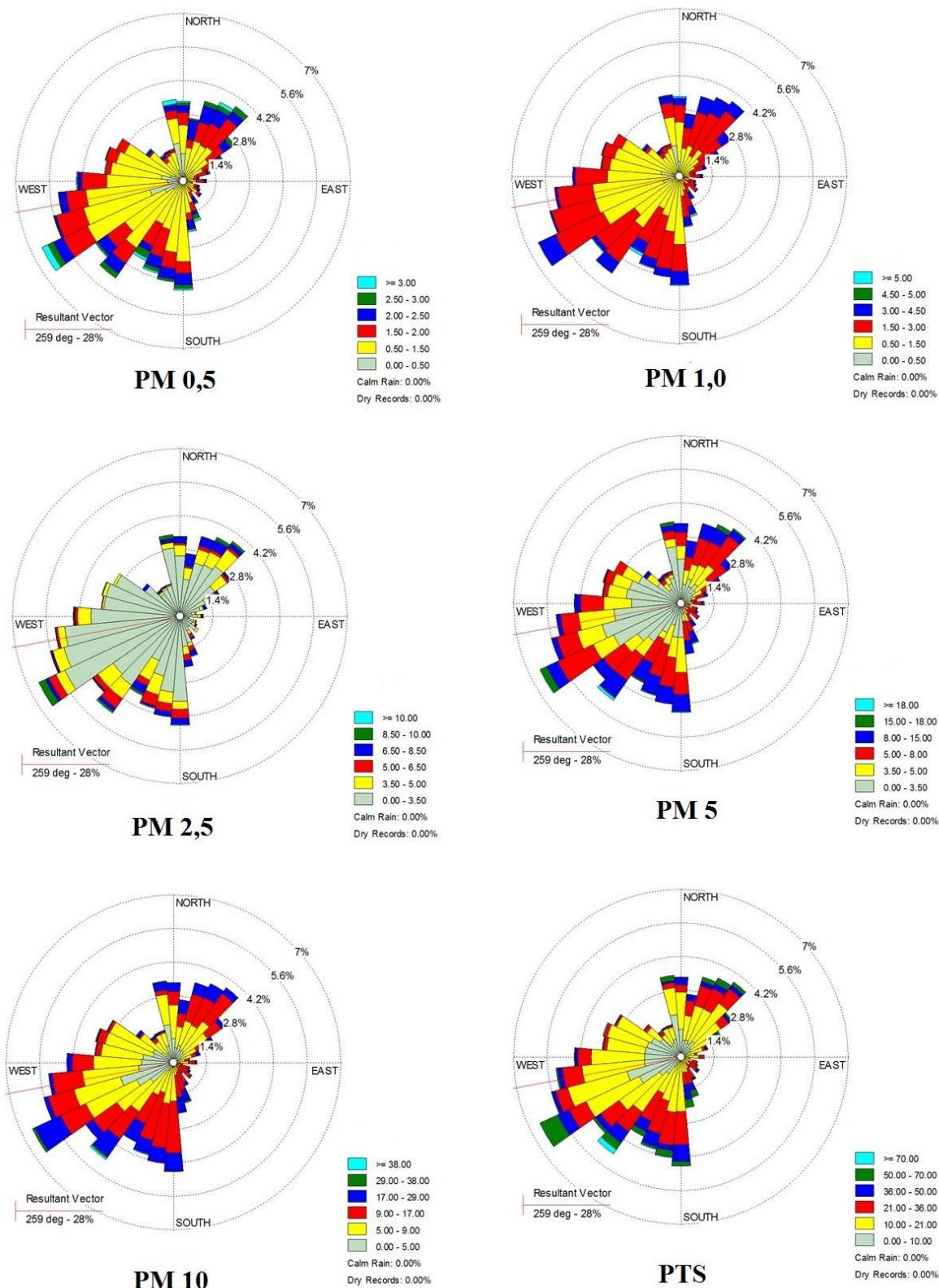


Figura 8. Rosa de los contaminantes. Los colores indican las concentraciones de material particulado atmosférico en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Fuente: Elaboración propia Melo D.

La rosa de los contaminantes para las partículas gruesas, tales como PTS, PM<sub>10</sub>, y PM<sub>5</sub>, se presentan concentraciones máximas de 83,03; 46,91 y 25,69 µg/m<sup>3</sup>, respectivamente. Para las fracciones finas PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>1</sub>, y PM<sub>0,5</sub>, se presentaron concentraciones máximas de 13,44; 6,47 y 4,34 µg/m<sup>3</sup>, respectivamente. Esto se da la quema de Diésel utilizado por vehículos y locomotoras en la zona (Ryan, 2014, Jaffe et al., 2014).

#### 7.4 Análisis de Correlación

En este estudio se realizó un análisis de correlación de Spearman, debido a que los datos presentaron una distribución no normal (Tabla 5). Este análisis indicará cual es la relación que tienen las variables meteorológicas con respecto a todas las fracciones de MP evaluados, así como la relación que hay entre las diferentes concentraciones de MP.

Como se puede observar en la Tabla 5, todas las fracciones de tamaño de partículas presentaron una intercorrelación superior a 0,7, lo que indica posiblemente una fuente similar para la formación del MP. Entre estas fuentes están la resuspensión de partículas por el aumento de velocidad del viento (Pérez et al., 2010). También se puede observar que la relación entre las fracciones PM<sub>0,5</sub>, PM<sub>1</sub> y PM<sub>2,5</sub> presenta coeficientes de correlación superiores a 0,9. Esto indica fuentes similares, que en este caso podría ser la combustión del diésel (Jaffe et al., 2015; Ryan, 2014; Akoaka, 2017). De la misma manera cuando comparamos las relaciones entre las fracciones PM<sub>5</sub>, PM<sub>10</sub> y PTS, también se observan coeficientes de correlación superiores a 0,9. En este caso, la fuente similar podría ser la emisión de partículas de carbón por los trenes o resuspensión de partículas sedimentadas por acción del viento o el paso del tren (Ryan, 2014; Jaffe et al., 2015).

Igualmente, se observa una correlación directa pero que no es significativa entre las diferentes fracciones de tamaño de partículas y la velocidad del viento. Esto es debido a que los vientos débiles aumentan la concentración de contaminantes de PM<sub>2,5</sub> debido a que generan una mínima dispersión, y si las fuentes son elevadas y los contaminantes son

La correlación entre la humedad relativa y las concentraciones de MP es positiva, es decir, directamente proporcional. Eso significa que el aumento de la humedad relativa aumentará las concentraciones como consecuencias de la aglomeración de partículas y procesos de condensación (Perez et al., 2010).

En una investigación realizada al suroeste de la Ciudad de México, se encontró una correlación entre la humedad relativa (HR) y la concentración de partículas suspendidas totales (PST) y las partículas de diámetro aerodinámico menor a 10  $\mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{10}$ ), se encontró que la correlación es de tipo directa PST ( $r=0.828$ ) que con las  $\text{PM}_{10}$  ( $r=0.749$ ). Ver tabla 5.

*Correlaciones de Spearman entre las concentraciones de MP y las variables meteorológicas*

[illegible]

## 8. Conclusiones

El transporte del carbón es una actividad que genera un aumento de las concentraciones de material particulado atmosférico en las fracciones gruesas y finas en las condiciones de paso de tren lleno, paso de tren vacío, minutos después del paso de un tren.

Las concentraciones medias durante el muestreo para las partículas gruesas fueron para PTS 27,56  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; PM<sub>10</sub> 13,57  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; PM<sub>5</sub> 6,89  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Se encontró que estas concentraciones ocurrieron en presencia de paso del tren lleno de carbón, lo que determina que el paso del tren lleno aumenta las concentraciones de PM para las partículas de mayor tamaño. Para las fracciones finas PM<sub>2,5</sub> 3,66 PM<sub>1</sub> 1,89  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y PM<sub>0,5</sub> 1,43  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , se encontró que estas concentraciones medias ocurrieron para el paso de los trenes tanto llenos como vacíos, lo que determina que el paso del tren en cualquiera de las condiciones aumenta las concentraciones de fracciones finas debido a que este tipo de partículas son generadas principalmente de la quema de combustibles fósiles como el Diésel.

Los intervalos de confianza y análisis de varianza reafirman los resultados y análisis estadísticos, donde se determinó que las diferencias entre las condiciones evaluadas no son estadísticamente significativas, pero se puede analizar que las mayores concentraciones se presentan al paso del tren lleno de carbón para el caso de las fracciones gruesas, y para las fracciones finas al paso de cualquier tren (lleno o vacío). Justificado por medio de un análisis de varianza ANOVA, donde se determinó que las concentraciones menores que PM<sub>2,5</sub> tienden a tener promedios iguales entre el paso del tren lleno y paso del tren vacío, lo que indica que no hay una diferencia en las concentraciones del paso del tren en cualquiera de las condiciones.

La rosa de los contaminantes, determinó que la mayoría provenía del sur oeste para todas las fracciones evaluadas, determinando que podría haber presencia de material particulado del área urbana por medio de la resuspension de partículas, esto se podría analizar con un análisis químico de las partículas evaluadas.

Dado lo anterior, esta investigación puede concluir que la actividad del transporte del carbón y su paso por el área urbana de Aracataca Magdalena, aumenta las concentraciones de material particulado en la zona, y que las variables meteorológicas no interactúan con las concentraciones, esto se da debido a que el punto de muestreo se encontraba a 5 metros de distancia de la línea férrea. También los cambios significativos que se dan al paso de un tren lleno en las partículas de mayor tamaño, que por medio de un análisis químico se podría determinar con eficacia su procedencia. Las partículas de menor tamaño, son contaminantes como el Diésel, pueden ser más preocupantes que el polvo de carbón, y esto se ve reflejado en el aumento de las concentraciones en el paso del tren en sus diferentes condiciones.

### **9. Recomendaciones**

Implementar un sistema de vigilancia de calidad de aire, el cual solo monitorea PTS, reemplazando por fracciones de partículas finas y ultra finas que son generadas tanto por el transporte de carbón como la quema de combustibles fósiles.

Se recomienda hacer una caracterización química de las partículas, con la finalidad de determinar las concentraciones por tipos de contaminantes ocasionados por la actividad del transporte del carbón.

Realizar estudios de ruido, para evaluar los impactos sobre la población que es un contaminante que se le suma a la actividad y es de gran importancia para la salud humana.

Realizar estudios toxicológicos, con la finalidad de evaluar los efectos negativos que tiene la exposición de contaminantes ocasionados por el transporte del carbón en la salud humana y medio ambiente.

Realizar seguimiento y control a las concentraciones de material particulado atmosférico en el área de influencia de la actividad del transporte del carbón.



### 10. Referencias

- Abbey, D., Ostro, B., Petersen, F., y Burchette, R. (1995) Chronic respiratory symptoms associated with estimated long-term ambient concentrations of fine particulates less than 2.5 microns in aerodynamic diameter (PM<sub>2.5</sub>) and other air pollutants. *J Expo Anal Environ Epidemiol.* 5(2), 137-59
- Akaoka, K., y Mckendry, I. (2016). Impact of coal-carrying trains on particulate matter concentrations in South Delta, British Columbia, Canada. *Environmental pollution* 2(23), 376-383.
- Alianza Mundial de Derecho Ambiental (2010). Guía para evaluar los EIA de los proyectos mineros. *Environmental Law Alliance Worldwide (ELAW)*, (pág. 13).
- Alvis, E. (2012). Impacto ambiental generado por el material particulado, sobre la calidad del aire en la zona de influencia de los proyectos carbonífero del departamento del cesar. *Pontificia Universidad Javeriana*. Recuperado de:  
<https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/19468>
- Aneja, V., Isherwood, A., y Morgan, P. (2011). Characterization of particulate matter (PM<sub>10</sub>) related to surface coal mining operations in Appalachia. *Atmospheric Environment*, 54, 496-501.
- Unidad de Planeación Minero Energetica (UPME). (2013). *El Carbón Colombiano, Fuente de energía para el mundo*. Ministerio de Minas y Energía.
- Arrieta, A. (2016). Dispersión de material particulado (pm<sub>10</sub>), con interrelación de factores meteorológicos y topográficos. *Ingeniería, Investigación y desarrollo*. 16(2), 43-54.
- Secretaria de Ambiente de Quito (2014). *Informe Final Inventario de Emisiones de Contaminantes Criterio*. Quito Recuperado de:

[www.quitoambiente.gob.ec/ambiente/phocadownload/cambio\\_climatico/infor\\_final\\_i\\_e\\_criterio\\_dm2011\\_1.pdf](http://www.quitoambiente.gob.ec/ambiente/phocadownload/cambio_climatico/infor_final_i_e_criterio_dm2011_1.pdf)

Bedoya, J., y Martinez, E. (2009). Calidad del Aire en el Valle de Aburrá Antioquia - Colombia. *DYNA*, 76(158), 7-15.

Bengumea P. (11 de diciembre de 2014). Aracataca pide que saquen del pueblo al tren carbonero. *El Tiempo*.

Recuperado: <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-14962895>

Botero, S., Trochez, A., y Olaya, J. (2004). Contaminación por Partículas Suspendidas Totales en las comunas 6 y 7 de Cali, Colombia. Un modelo estadístico para la evaluación de la calidad del aire. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*. 1(2), 17-21

Candanoza, S., Goribar, L., y Garcia, F. (2013). Relación Partículas Respirables (PM10)/ partículas suspendidas totales (PTS) en Santa Marta (Colombia), *Revista Universidad Nacional de Colombia*, 80(179), 165-175.

Chamarra, O., y Saavedro, G. (2013). *Evaluación del impacto ambiental generado por la emisión de gases en motores que utilizan complementos lubricantes en la ciudad de Bogota D.C.* (Tesis de Maestría) Bogota, Centro de investigaciones en medio ambiente y desarrollo.

Contraloría General de la República. (2013). La Minería en Colombia: Institucionalidad y territorio, paradojas y conflictos. Imprenta Nacional de Colombia (págs. 230-231). Bogota: Imprenta.

Cruz, F. (2010). Material Particulado en el Aire: un problema de Salud Pública. *Medicina medio ambiente políticas publicas salud*. 15(29), 103-115

Defensoria del Pueblo. (2008). Explotación, Transporte y Embarque de Carbón en los Departamentos de Cesar y Magdalena. Bogota.

Diaz, V., y Paez, C. (2006). Contaminación por material particulado en Quito y caracterización química de las muestras. *Corporacion para el mejoramiento del aire de Quito (CORPARIE)*, 3(2), 308-322

Tomado de:

[http://www.academia.edu/10342786/Contaminaci%C3%B3n\\_por\\_material\\_particulado\\_en\\_Quito\\_y\\_caracterizaci%C3%B3n\\_qu%C3%ADmica\\_de\\_las\\_muestras](http://www.academia.edu/10342786/Contaminaci%C3%B3n_por_material_particulado_en_Quito_y_caracterizaci%C3%B3n_qu%C3%ADmica_de_las_muestras)

Dominici, F., Peng, R., Bell, M., Phan, L., McDermott, A., Zeger, S., y Samet, J. (2007). Fine Particulate Air Pollution and Hospital Admission for Cardiovascular and Respiratory Diseases. *American Medical Association*, 296(10), 1127- 1134.

Doria, C. y Fagundo, J. (2016). Niveles de metales en partículas atmosféricas en la zona minera de carbón, norte de Colombia. *ITECKNE*, 14(2), 110-121.

Drummond (2013). Medidas de manejo implementadas en los proyectos mineros de Drummond en el Cesar para el manejo de la calidad del aire en su área de influencia. Drummond LTD.

Echeverri, C. (2000). Determinación de las concentraciones de fondo de material particulado en suspensión en la ciudad de Medellín. (Tesis de Maestría) *Facultad de Ingeniería. Universidad de Medellín*.

Fang, G., Wu, S., Chang, S., Rau, Y., Huang, S., y Lin, S. (2006). Characteristic study of ionic species in nano, ultrafine, fine and coarse particle size mode at a traffic sampling site. *Facultad Nacional de Salud* 21(1) 210-222

- García, F., Agudelo, R., y Jiménez, K. (2006). Distribución espacial y temporal de la concentración de material particulado en Santa Marta. *Facultad Nacional de Salud Pública*, 24(2), 120-136.
- Gaviria, C., Benavides, P., y Tangarife, C. (2011) Contaminación por material particulado (PM<sub>2,5</sub> y PM<sub>10</sub>) y consultas por enfermedades respiratorias en Medellín (2008-2009). *Facultad Nacional de Salud Pública*, 29(3), 241-250.
- Gonzalez, C., Cortes, J., y Aristizabal, B. (2014). Influence of meteorology and source variation on airborne PM<sub>10</sub> levels in a high relief tropical Andean city. *Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia*, (74), 200-212
- Grupo de investigación geomática, gestión y optimización de sistemas. (2011). *informe de operación del sistema especial de vigilancia de calidad de aire en la zona carbonífera del departamento del cesar*. Bucaramanga.
- Jaffe, D., Hof, G., Malashanka, S., Putz, J., Thayer, J., Fry, J., Pierce, J. (2014). Diesel particulate matter emission factors and air quality implications from in service rail in Washington State, USA. *Atmospheric Pollution Research*, 5(2), 344-351.
- Jaffe, D., Putz, J., Hof, G., Hof, G., Hee, J., Lommers, J., Minsk, M. (2015). Diesel particulate matter and coal dust from trains in the Columbia River Gorge, Washington State, USA. *Atmospheric Pollution Research*, 6(6), 946-952.
- IDEAM. (2012). *Estado de la Calidad del Aire en Colombia 2007-2010* . Bogota D.C.
- Kassomenos, S., Vardoulakis, A., Chaloulakou, G., Grivas, R., Borge, J., y Lumbreras, S., (2012). Levels, sources and seasonality of coarse particles (PM<sub>10</sub> - PM<sub>2,5</sub>) in three European capitals e Implications for particulate pollution control. *Atmospheric Environment*, (54), 337-347.

- Lashof, D., Duncan, D., y Devine, J. (2007). Coal in a Changing Climate. *Natural Resources Defense Council*, (31), 64-81
- Macias, C., (2007). *El carbón, el recorrido de los minerales*. Madrid, España: Domènech e-learning multimedia, S.A.
- Martin, C. (2016). La nube negra sobre Europa: efectos de la quema de carbón sobre la salud y la economía de la UE. *Organización fondo mundial para la naturaleza WWF. España*.
- Martínez, E., Díaz, Y. (2004). *Contaminación atmosférica*. Ciudad Real, España: Universidad de Castilla-La Mancha.
- Melo, Diego., Peña, R., Rocha, J., y Torres, A. (2015). Carbón de Colombia ¿Quién gana? ¿Quién pierde? Minería, Comercio global y Cambio climático. Bogotá: *Centro de Estudios para la Justicia Social Tierra Digna*. Pag. 172 Recuperado de: <http://tierradigna.org/pdfs/informe-carbon.pdf>
- Ministerio de Agricultura y Pesca Alimentación y Medio Ambiente. (2016). *Partículas en suspensión*. Gobierno de España.
- Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. (2010). Resolución 610 del (2010). Recuperado de <http://www.minambiente.gov.co>
- Molina, O. (2017). Causas del aumento del viento en la contaminación. Recuperado de: <http://www.lacronica.com/EdicionEnLinea/Notas/Noticias/09072018/1355567-Fuertes-rachas-de-vientos-y-polvo-se-aproximan-hacia-Mexicali-y-alrededores.html>
- More, M. (2014). Dispersión de contaminantes atmosféricos: Modelo gaussiano de la columna de humo. *Universidad Pablo de Olavide*.

- Prendéz, M., Corvalán, R., y Cisternas, M. (2007). Estudio preliminar del material particulado de fuentes estacionarias: aplicación al sistema de compensación de emisiones en la región Metropolitana, Chile. Chile. *Informacion Tecnologica*, 18(2), 93-103
- Pulido, T. (2014). Impacto ambiental del polvillo del carbón en la salud en Colombia. *CES Salud Pública*, 5(1), 21-36
- Quijano, A., y Orozco, J.(2005). Monitoreo de material particulado fraccion respirable (PM 2.5) en Pamplona (Colombia). *Facultad de Ciencias Basicas*, 3(2), 110-132.
- Quiroz, L.; y Medina, E. (2012). *Estudio epidemiológico desarrollado para evaluar los efectos de las actividades de explotación y manejo de carbón mineral sobre la salud respiratoria en la población de la zona carbonífera del Cesar*. Universidad Nacional de Colombia.
- Ramos, S., Bautista, R., y Valdes, A. (2010). Estudio estadístico de la correlación entre contaminantes atmosféricos y variables meteorológicas en la zona norte de Chiapas, México. *Universidad y ciencia*, 26(1), 65-80.
- Ryan, L., (2014). Analysis of ARTC Data on Particulate Emissions in the Rail Corridor. Environment Protection Authority. *Environment Protection Authority*. ABN 55 098 424 312.
- Samara, C., y Voutsas, D. (2005). Size distribution of airborne particulate matter and associated heavy metals in the roadside environment. *Journal Chemosphere*, 59(8), 1197-1206.

- Silva, A., y Arcos, D. (2009). Application of the AERMOD software for modeling PM10 dispersion emitted by wood-burning heating equipments in Constitución city. *Obras y proyecto*, (9), 4-10
- Solarte, Pedro., Caicedo, M., y Restrepo., S. (2002) Contaminación atmosférica y enfermedad respiratoria en niños menores de 14 años en Bogotá. *Médica Sanita*. Vol 5(2), 503-515
- Turner, D., y Schulze, R. (2007) Practical Guide to Atmospheric Dispersion Modeling. Air and Waste Management Association – *Trinity Consultants*, Inc. USA.
- Vargas, F., y Rojas, N. (2010). Chemical composition and mass closure for airborne particulate matter in Bogotá. *Ingeniería e Investigación*, 30(2), 105-115.
- Venegas, L., y Mazzeo, N. (2012). La velocidad del viento y la dispersión de contaminantes en la atmosfera. *Consejo nacional de investigaciones científicas y técnicas Departamento de Ingeniería Química, Facultad Regional Avellaneda, Universidad Tecnológica Nacional*.
- Vicente, A (2015) Contaminación del aire por material particulado (PM10.0 y PM2,5), *Observatorio Urbano de León, Bogotá D.C.*
- Villanueva, T. (2009). El Carbón en Castilla y León. *Seguridad y calidad mineroambiental*. Doméneche-learning multimedia, S.A.
- Viney, A., Aaron, I., y Morgan, P. (2011). Characterization of particulate matter (PM10) related to surface coal mining. *Atmospheric Environment*, (54), 496-501.
- Wellenius, G., Schwartz, J., y Mittleman, M. (2005). Air pollution and hospital admissions for ischemic and hemorrhagic stroke among medicare beneficiaries. *US National Library of Medicine National Institutes of Health*. 36(12), 49-53.

## 11. ANEXOS

*Anexo 1. Evaluación de las concentraciones de MP durante el paso del tren lleno de carbón*



**Fuente:** Elaboración propia Melo D.

*Anexo 2. Contador de partículas HPC, midiendo las concentraciones de material particulado en tiempo real.*



**Fuente:** Elaboración propia Melo D.



*Anexo 3. Clasificación de concentraciones, según su escenario.*

Hora	Horario	Tren	PTS	PM 0,5	PM 1,0	PM 2,5	PM 5,0	PM 10,0
14:11:18	18/08/2017 14:11	NP	34,784	2,177	3,244	7,687	12,99	22,164
14:12:23	18/08/2017 14:12	NP	30,474	2,18	3,241	7,528	12,248	20,767
14:13:28	18/08/2017 14:13	NP	30,045	2,237	3,307	7,845	13,333	21,114
14:14:33	18/08/2017 14:14	TV	30,377	2,177	3,282	7,77	12,828	20,281
14:15:38	18/08/2017 14:15	TV	23,998	2,18	3,244	7,464	12,031	18,174
14:16:43	18/08/2017 14:16	TV	29,726	2,237	3,222	7,568	12,616	19,824
14:17:48	18/08/2017 14:17	TV	28,011	2,169	3,234	7,817	12,639	19,274
14:18:53	18/08/2017 14:18	S	30,724	2,144	3,163	7,606	12,531	19,657
14:19:58	18/08/2017 14:19	S	28,8	2,118	3,147	7,551	11,933	20,452
14:21:03	18/08/2017 14:21	S	30,892	2,128	3,141	7,496	12,093	21,185
14:22:08	18/08/2017 14:22	S	28,3	2,134	3,179	7,696	12,601	19,563
14:23:13	18/08/2017 14:23	S	23,365	2,139	3,189	7,598	12,359	17,929
14:24:18	18/08/2017 14:24	NP	34,081	2,181	3,231	7,64	13,455	21,073
14:25:23	18/08/2017 14:25	NP	29,919	2,15	3,19	7,66	12,452	19,823
14:26:28	18/08/2017 14:26	NP	29,939	2,114	3,13	7,455	12,799	19,843
14:27:33	18/08/2017 14:27	NP	32,24	2,13	3,142	7,434	12,697	20,396

**Fuente:** Elaboración propia Melo D.

*Anexo 4. Tabla de Análisis de varianza de PM<sub>0,5</sub> para Tren lleno (TL) y tren vacío (TV).*

RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
TV	140	181,17	1,29	0,85		
TL	140	174,84	1,25	0,68		

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,143	1	0,143	0,187	0,666	3,875
Dentro de los grupos	212,43	278	0,764			
Total	212,58	279				

**Fuente:** Elaboración propia Melo D.

Anexo 5. Tabla de Análisis de varianza de  $PM_{1,0}$  para Tren lleno (TL) y tren vacío (TV).

RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
TV	136	235,51	1,73	1,69		
TL	144	265,26	1,84	1,43		

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,853	1	0,85	0,548	0,460	3,875
Dentro de los grupos	432,63	278	1,56			
Total	433,49	279				

Fuente: Elaboración propia Melo D.

Anexo 6. Tabla de Análisis de varianza de  $PM_{2,5}$  para Tren lleno (TL) y tren vacío (TV).

RESUMEN					
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza	
TV	136	415,66	3,06	5,74	
TL	144	524,77	3,64	7,44	

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	24,17	1	24,17	3,652	0,06	3,875
Dentro de los grupos	1840,19	278	6,62			
Total	1864,36	279				

Fuente: Elaboración propia Melo D.

*Anexo 7. Tabla de Análisis de varianza de PM<sub>5</sub> para Tren lleno (TL) y tren vacío (TV).*

RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
TV	128	709,41	5,54	16,54		
TL	144	980,69	6,81	24,69		

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	108,97	1	108,98	5,225	0,023	3,876
Dentro de los grupos	5631,71	270	20,86			
Total	5740,69	271				

*Fuente: Elaboración propia Melo D.**Anexo 8. Tabla de Análisis de varianza de PM<sub>10</sub> para Tren lleno (TL) y tren vacío (TV).*

RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
TV	136	1535,09	11,29	52,46		
TL	145	1853,69	12,78	88,58		

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	157,18	1	157,18	2,211	0,138	3,875
Dentro de los grupos	19837,72	279	71,10			
Total	19994,90	280				

*Fuente: Elaboración propia Melo D.*

*Anexo 9. Tabla de Análisis de varianza de PTS para Tren lleno (TL) y tren vacío (TV).*

RESUMEN						
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>		
TV	140	3085,58	22,04	194,98		
TL	145	3799,63	26,204	321,01		

ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	1235,28	1	1235,281	4,767	0,030	3,875
Dentro de los grupos	73327,26	283	259,107			
Total	74562,54	284				

*Fuente: Elaboración propia Melo D.*